

Erschütterungsübertragung über den Baugrund in der Reinraumtechnik: Rechnerische Prognose und messtechnische Überprüfung

Dr.-Ing. Dietrich Klein & Dr.-Ing. Fritz-Otto Henkel

Wölfel Beratende Ingenieure GmbH & Co. KG, Max-Planck-Str. 15., 97204 Höchberg

ZUSAMMENFASSUNG: Ein Aspekt der Reinraumtechnik ist die Begrenzung von Erschütterungen der Produktionsstätten im Reinraum. Es ist deswegen erforderlich, schon in der Planungsphase geeignete Maßnahmen zum Schutz der erschütterungsempfindlichen Geräte zu ergreifen. Am Beispiel des Reinraums eines Forschungszentrums der Nano-Technologie werden rechen-technische Möglichkeiten zur Prognose der Einleitung und Übertragung der Erschütterungen über den Baugrund aufgezeigt und es wird die messtechnische Überprüfung der bautechnischen Maßnahmen noch während des Baufortschrittes beschrieben.

1. EINLEITUNG

Im neu errichteten Gebäudekomplex eines Forschungszentrums wurde unter anderem ein Reinraum der Reinheitsklasse ISO 5 zur Herstellung mikroelektronischer Strukturen und nano-strukturierter Materialien eingerichtet. Wegen der hohen Empfindlichkeit der darin verwendeten technischen Geräte gegen Erschütterungen wurde es erforderlich, schon in der Planungsphase Maßnahmen zur Reduzierung der Erschütterungen am Standort der Geräte vorzusehen. Für die Erschütterungsverträglichkeit wurde die Kurve VC-C nach den Kriterien von Gordon festgelegt. Diese begrenzt das Terzspektrum des Effektivwertes der Schwinggeschwindigkeiten im Bereich oberhalb 8 Hz auf $12,5 \mu\text{m/s}$.

Erschütterungen der genannten Größenordnung können durch den Straßenverkehr in der Umgebung des Produktionsbetriebes, durch Transport-Bewegungen im Betriebsgebäude selbst und vor allem durch die Haustechnik im Betriebsgebäude hervorgerufen werden. Letzteres ist gerade bei reinraumtechnischen Anlagen von besonderer Bedeutung, da der Betrieb des Reinraums leistungsfähige Lüftungssysteme erfordert, die wiederum Schwingungen am Aufstellort der Lüftungsaggregate sowie durch Luftströmungen in den Rohrleitungen im Gebäude erzeugen. Eine Erschütterungsminderung durch diese Erreger ist alleine durch konstruktive Maßnahmen möglich wie schwingungsisolierte Aufstellung bzw. Aufhängung der Geräte sowie eine möglichst weitgehende bauliche Trennung des Reinraumes vom Betriebsgebäude.

Im vorliegenden Fall wurde der ebenerdige Reinraum durch eine umlaufende Fuge vom Grauraum und dieser wiederum durch Fugen von den übrigen Gebäuden, insbesondere vom Techniktrakt mit den Versorgungssystemen des Reinraums, getrennt. Für den besonders schwingungsempfindlichen Lithographen wurde ein eigener, nochmals

von der Reinraumplatte getrennter Fundamentblock geschaffen. Abbildung 1 zeigt die Zuordnung der einzelnen Bauteile mit Anordnung der Trennfugen.

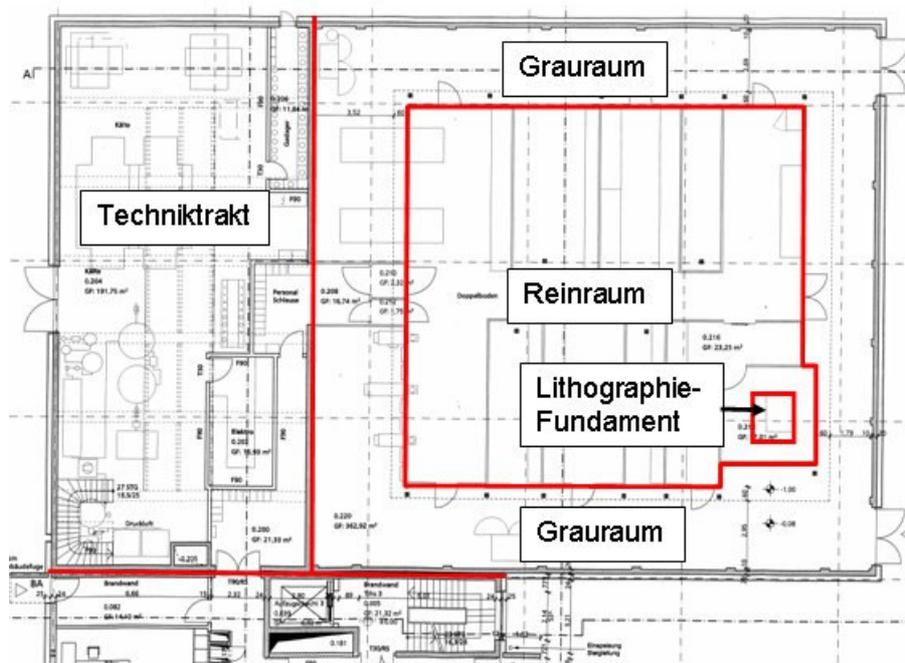


Abbildung 1: Grundriss der einzelnen Bauteile, rot: Gebäudetrennfugen

Die Trennfugen verhindern die Übertragung von Erschütterungen zwischen den Bauteilen auf direktem Wege. Die Erschütterungsübertragung über den Baugrund kann jedoch auch damit nicht verhindert werden. Es wurde deswegen erforderlich, schon in der Planungsphase die möglichen Erschütterungen von Reinraumplatte und Lithographiefundament abzuschätzen, um gegebenenfalls rechtzeitig Abhilfemaßnahmen einzuplanen.

2. RECHNERISCHE UNTERSUCHUNGEN

Die rechnerischen Untersuchungen lassen sich drei Aufgabenbereichen zuordnen:

1. Ermittlung der Einleitung von Erschütterungen in die Gebäudestruktur; erforderlich insbesondere bei nicht unmittelbar aufgestellten Geräten, hier gezeigt am Beispiel von elastisch aufgehängten Geräten im Grauraum.
2. Ermittlung der Einleitung von Erschütterungen aus dem Betrieb der haustechnischen Geräte in den Baugrund, hier an der Sohlfläche des Techniktraktes.
3. Ermittlung der Übertragung von Erschütterungen über den Baugrund (Bauwerk-Boden-Bauwerk Wechselwirkung).

2.1 EINLEITUNG VON ERSCHÜTTERUNGEN IN DIE GEBÄUDESTRUKTUR

Die Lüftungs- und Klimageräte des Reinraums werden in einem Stahlgerüst aufgestellt, das unter der Dachdecke des Grauraums abgehängt ist. Wegen der Nähe zum Reinraum wurde hier in einer detaillierten Modellberechnung untersucht, welche Erregungen bei

Schwingungsanregungen durch den Lüfter auf den Grauraum wirken. Dazu wurde die Stahlbühne einschließlich Deckenträger des Grauraums auf ein Finite-Elemente Modell abgebildet mit den Lüftungsaggregaten als starre Massen, siehe Abbildung 2. Mit diesem Modell wurden für eine geschätzte Unwuchtanregung aus dem Lüfter die Frequenzgänge der Auflagerkräfte auf die Wände des Grauraums ermittelt, siehe Abbildung 3. Auf der Grundlage dieser Frequenzgänge kann nun die Ausführung und Lagerung der Lüftungsaggregate so optimiert werden, dass die Anregung des Grauraumes ausreichend gering bleibt.

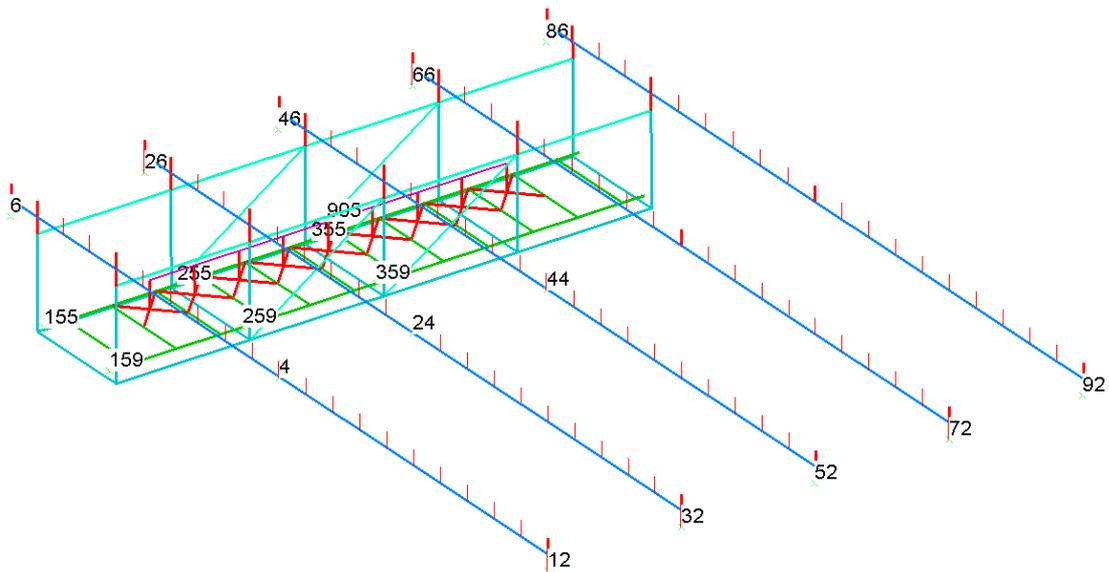


Abbildung 2: Stahlbühne für Kühlaggregate, Finite Element Modell

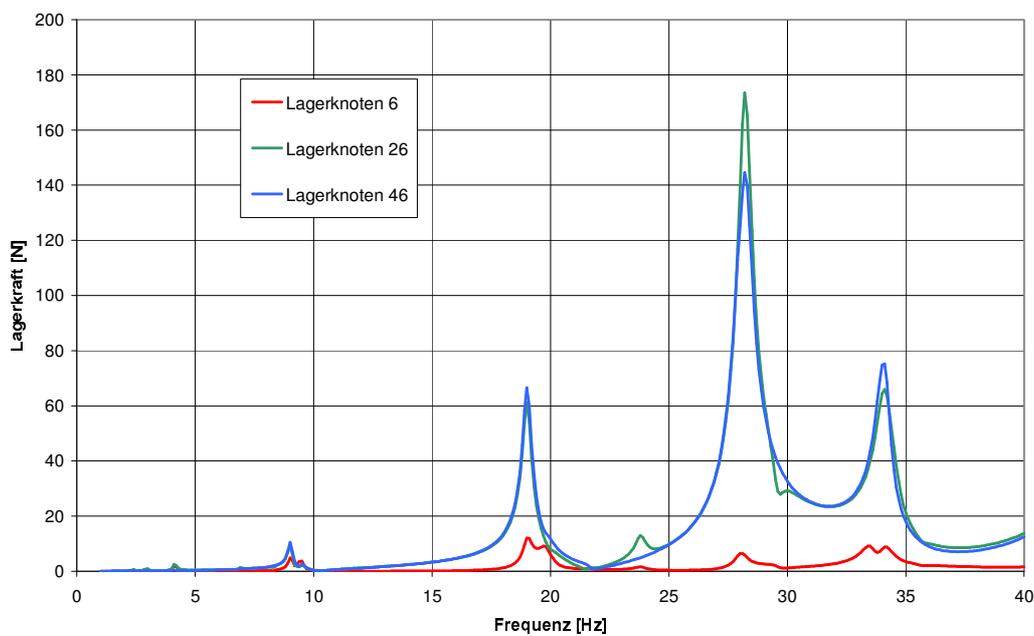


Abbildung 3: Frequenzgang der Lagerkräfte infolge Unwuchterregung

2.2 EINLEITUNG VON ERSCHÜTTERUNGEN IN DEN BAUGRUND

Während der Planungsphase ist meist noch nicht bekannt, welche haustechnischen Geräte im Endzustand zur Ausführung kommen. Die Anregung aus diesen Geräten kann deswegen nur aus bekannten Daten vergleichbarer Geräte hergeleitet werden. Auf dieser Basis genügt in der Regel eine Abschätzung der Einwirkungen über das globale Schwingungsverhalten des Gebäudes. Der Rechengang ist folgender:

1. Ermittlung der Anregelast am Standort des Aggregates; meist als Unwucht abhängig von Drehzahl und Masse der rotierenden Teile.
2. Ermittlung der globalen Eigenfrequenz des Gebäudes aus Gebäudemasse und Steifigkeit des Baugrundes.
3. Ermittlung der Schwingungen des Gebäudes auf dem Baugrund über das Verhältnis aus Erregerfrequenz und Gebäude-Eigenfrequenz.

In Tabelle 1 ist exemplarisch der Rechengang für den Rückkühler auf dem Dach des Techniktraktes, einen der Haupterreger, zusammengestellt. Die zu erwartende Schwinggeschwindigkeit am Fundament des Techniktraktes liegt zwischen 4 und 7 $\mu\text{m/s}$. Aus der Anregung aller relevanten Aggregate folgt bei ungünstigster, betragsmäßiger Überlagerung eine Anregung zwischen 5 $\mu\text{m/s}$ und 10 $\mu\text{m/s}$. Mit diesen Anregungen liegt man also noch im zulässigen Bereich.

		Dim.	min U	max U
1. Maschinendaten	Drehzahl U	1/min	675	895
	Läufermasse m_L	kg	546	546
	Unwuchtkraft F (für Q6,3)	N	244	323
2. Gebäudedaten	Gebäudemasse m_G	to	1.640	
	Bodenfeder vertikal (geschätzt) k_V	MN/m	5.700	
	Grundfrequenz f	Hz	9,4	
3. Fußpunktanregung	Grundwert der Geschwindigkeit v	$\mu\text{m/s}$	3,0	5,3
	dynamischer Lastfaktor DLF (ungedämpft)	--	2,3	0,7
	zu erwartende Anregung: v·DLF	$\mu\text{m/s}$	6,9	3,7

Tabelle 1: Zu erwartende Anregung aus Rückkühler

2.3 ERSCHÜTTERUNGSÜBERTRAGUNG ÜBER DEN BAUGRUND

Die Berechnung des Übertragungsverhaltens über den Baugrund erfolgte mit dem Programmsystem SASSI2000. Dieses Programm wurde speziell für die realitätsnahe Analyse des Schwingungsverhaltens von Baustrukturen auf beliebig geschichtetem Baugrund entwickelt. Es wird weltweit, u. a. auch für Erdbebenberechnungen oder bei Maschinengründungen, eingesetzt. Es ist insbesondere für die Berechnung der Übertragung von Erschütterungen aus einem Gebäude in ein Nachbargebäude geeignet. Das hier verwendete Berechnungsmodell ist schematisch in Abbildung 4 dargestellt. Die Gebäude können im frühen Planungsstadium nur in erster Näherung erfasst werden. Der Baugrund wird durch mehrere Schichten unterschiedlicher Eigenschaften abgebildet. Wegen der eingeschränkten Kenntnisse über die Baugrundeigenschaften werden für die Bodenparameter auf der sicheren Seite liegende Annahmen getroffen.

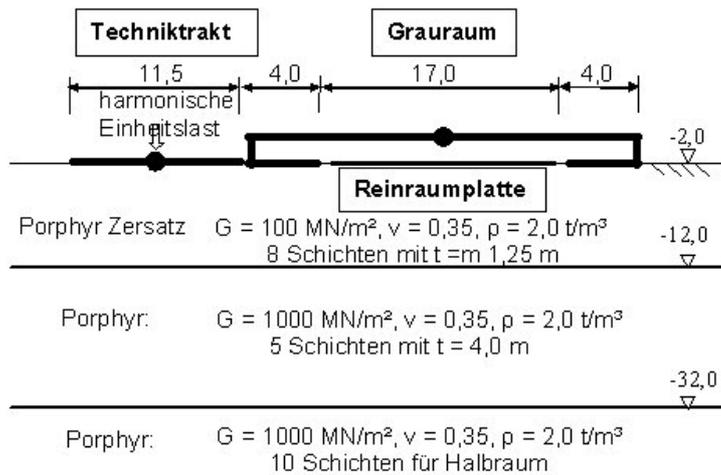


Abbildung 4: Berechnungsmodell

Zur Berechnung des Übertragungsverhaltens wird in einem Gebäude, hier im Techniktrakt, eine harmonische Einheitslast aufgebracht und die Schwingantworten an beliebigen Stellen der Nachbargebäude berechnet. Die Berechnungen erfolgen im Frequenzbereich, d. h. es werden die Übertragungsfunktionen als Frequenzgänge des Verhältnisses der Schwingantworten an den ausgewählten Punkten zur Schwingung an der Erregerstelle über den maßgebenden Bereich der Erregerfrequenzen ermittelt. In Abbildung 5 sind die Übertragungsfunktionen für drei Stellen der Reinraumplatte dargestellt. Spitzen in den Übertragungsfunktionen deuten auf Schwingungsresonanzen der Gebäude hin. Mit Ausnahme eines begrenzten Bereiches um 10 Hz ist selbst bei den konservativen Annahmen eine Abminderung der Erschütterungen durch den Baugrund zu erwarten, so dass die ertragbaren Erschütterungen an der Reinraumplatte sicher eingehalten werden.

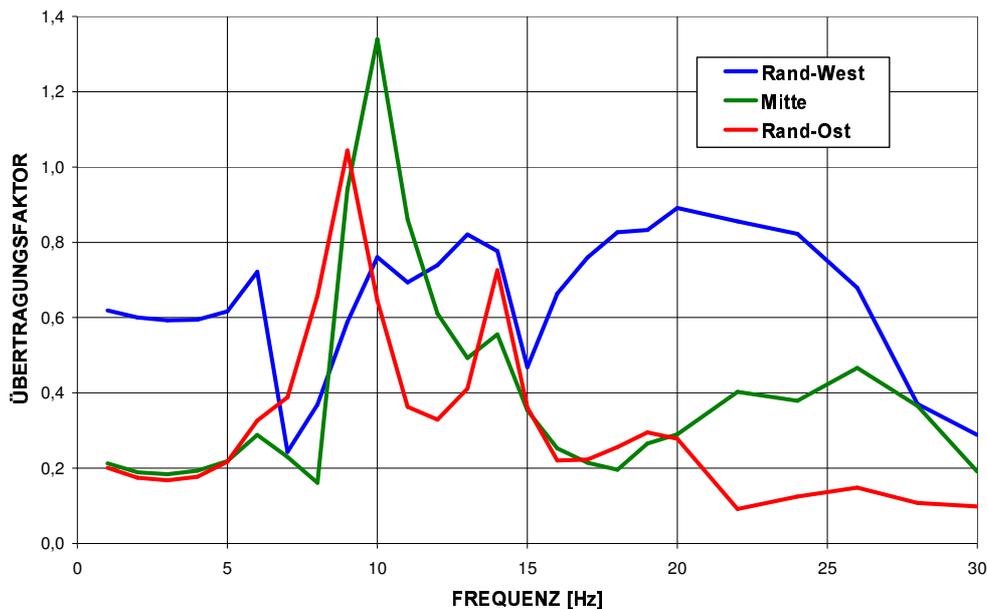


Abbildung 5: Rechnerische Übertragungsfunktionen vertikal

3. MESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN

Der Zeitpunkt nach Rohbaufertigstellung der Gebäude wurde genutzt, um noch vor Einbau der technischen Gebäudeausrüstung den erreichten Stand der erschütterungstechnischen Entkopplung von Techniktrakt und Reinraumplatte zu überprüfen. Dazu wurden an verschiedenen Standorten im Techniktrakt frequenzabhängige Erregungen mit einem Unwuchterreger über Hochläufe bis 1250 U/min eingebracht und die Erschütterungen (Schwinggeschwindigkeiten) an der Erregerstelle sowie an den zu schützenden Aufpunkten gemessen. Aus dem Vergleich der Erschütterungen lassen sich frequenzbezogene Übertragungsfunktionen herleiten sowie Rückschlüsse auf die maximal zulässigen Erregungen zur Einhaltung der Erschütterungsgrenzen ziehen.

3.1 ANTWORT-ZEITVERLÄUFE

Die Auswertung der Messungen erfolgt mit der Mess- und Auswertesoftware MEDA von WÖLFEL Meßsysteme Software GmbH & Co. Die Geschwindigkeits-Zeitverläufe ermöglichen einen ersten Überblick über das Schwingungsverhalten der Strukturen. Abbildung 6 zeigt ausgewählte Zeitverläufe bei einer vertikalen Erregung auf der Bodenplatte des Techniktraktes. Der oberste Zeitverlauf, MP201, wurde direkt neben dem Unwuchterreger auf der Bodenplatte aufgenommen. Er dient als Bezug für die Beurteilung des Übertragungsverhaltens. Die nächsten beiden Zeitverläufe sind neben der Trennfuge zwischen Techniktrakt und Grauraum aufgenommen mit MP202 auf der Seite des Techniktraktes (vor der Fuge) und MP203 auf der Seite des Grauraums (nach der Fuge). Der vierte Zeitverlauf, MP205, wurde in Mitte der Reinraumplatte aufgenommen. Beim Vergleich der Zeitverläufe ist die feinere Skalierung der drei letztgenannten Zeitverläufe an den Antwortstellen zu beachten.

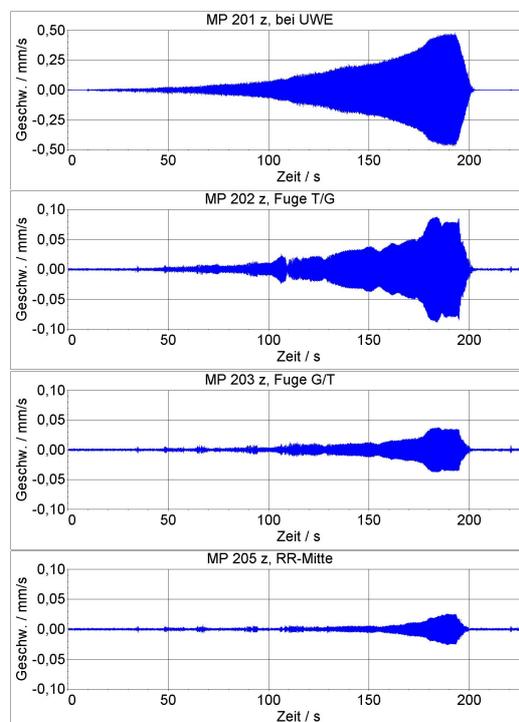


Abbildung 6: Schwinggeschwindigkeiten vertikal

Bei allen Zeitverläufen ist der Anstieg der Geschwindigkeit proportional zu der mit der Drehzahl von 0 bis zum Maximum ansteigenden Unwucht charakteristisch. Mit zunehmendem Abstand von der Erregerstelle ist dieser Anstieg jedoch weniger ausgeprägt. Im unteren Drehzahlbereich bis ca. 480 U/min (8 Hz) ist die Unwucht noch so gering, dass die Antwortschwingungen an den zu schützenden Aufpunkten MP203 und MP204 durch das allgemein vorhanden Umweltrauschen überdeckt werden. Im oberen Drehzahlbereich dagegen werden Erregerkräfte eingeleitet, die über den aus der Haustechnik zu erwartenden Erregerkräften liegen.

Der Vergleich der Schwingungen von MP202 (vor der Trennfuge) und MP203 (nach der Trennfuge) zeigt deutlich die Wirkung der konsequenten Trennung der Gebäude. Die Erschütterungen werden auf weniger als die Hälfte abgemindert. In Mitte Reinraum, MP205, nehmen die Schwingungsamplituden nochmals, wenn auch nur geringfügig, ab. Diese Abnahme ist durch den größeren Abstand zur Erregerstelle im Techniktrakt bedingt.

3.2 ÜBERTRAGUNGSFUNKTIONEN

Zur Herleitung der Übertragungsfunktionen werden die Amplitudenspektren (Fourier-Analyse) zu den einzelnen Zeitverläufen an den zu schützenden Aufpunkten berechnet und auf das Amplitudenspektrum an der Erregerstelle bezogen. In Abbildung 7 sind die Übertragungsfunktionen für den relevanten Frequenzbereich zwischen 8 Hz und 20 Hz dargestellt.

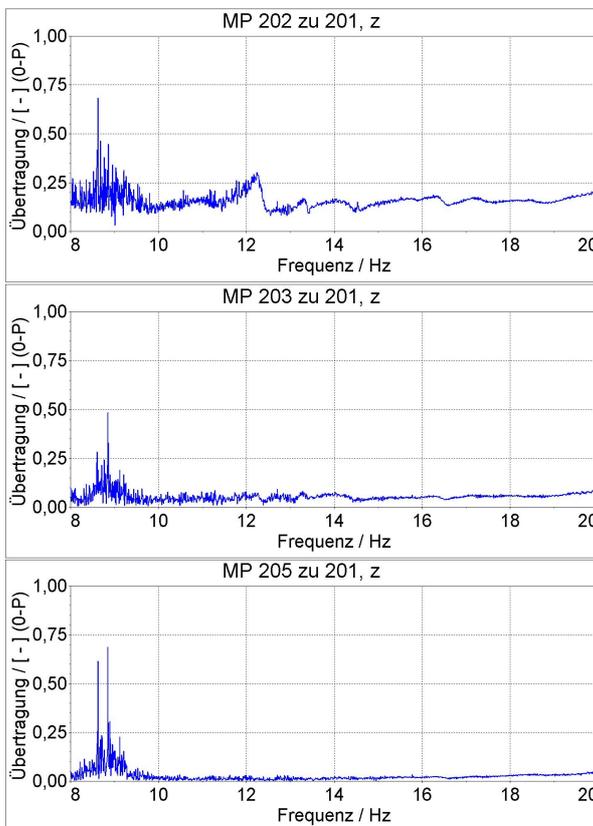


Abbildung 7: Übertragungsfunktionen

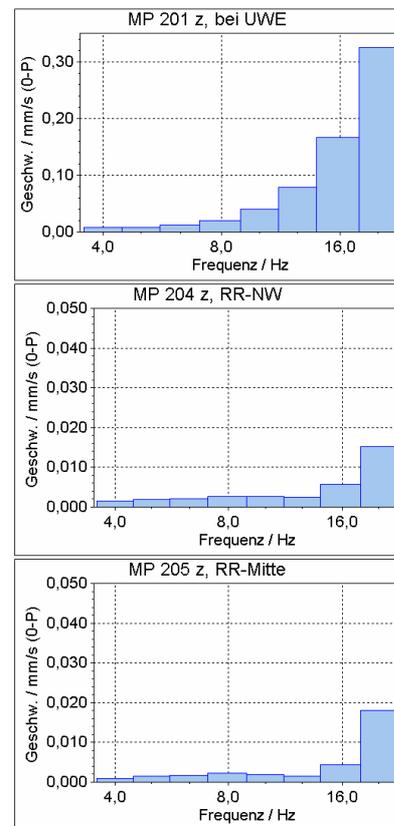


Abbildung 8: Terzspektren

Bei 9 Hz sind ausgeprägte Spitzen in den Übertragungsfunktionen zu erkennen. Diese Spitzen werden durch Resonanzen der Gebäude auf dem Baugrund verursacht. Sie stimmen gut mit den im Rechenmodell ermittelten Eigenfrequenzen der Gebäude überein, siehe Abbildung 3 zum Vergleich. Oberhalb von 10 Hz werden die Erschütterungen am MP202, also noch im Techniktrakt vor der Gebäudefuge, auf 20 % bis 25 % und an den MP203, Grauraum, und MP205, Reinraum, also jenseits der Trennfugen, auf Werte deutlich unter 10 % abgemindert..

3.3 BEWERTUNG ANHAND DER TERZSPEKTREN

Zur quantitativen Bewertung im Vergleich mit den einzuhaltenden Erschütterungsgrenzen werden die Terzschnellespektren (Maximalwert des gleitenden Effektivwertes in den einzelnen Terzbändern) benötigt. In Abbildung 8 sind die Terzspektren für die Frequenzbänder von 4 bis 20 Hz dargestellt. Das oberste Spektrum zeigt die vertikalen Erschütterungen am Standort des Unwuchterregers, MP201. Darunter sind die Spektren für den Rand, MP204, und die Mitte, MP205, der Reinraumplatte dargestellt. Auch hier ist der unterschiedliche Maßstab in der Darstellung zu beachten.

An der Anregestelle steigen die Spektralwerte erwartungsgemäß bei quadratischem Anstieg der Unwuchtkraft mit der dritten Potenz der Frequenz an. An den zu schützenden Aufpunkten ist ein entsprechender Anstieg nur in den oberen Frequenzbändern zu beobachten. Im unteren Frequenzbereich mit dem Umweltrauschen als dominierende Anregung sind die Spektralwerte annähernd konstant. Sie liegen unter $2 \mu\text{m/s}$ und damit ausreichend weit unter dem Grenzwert von $12,5 \mu\text{m/s}$.

Zur Bewertung der Ergebnisse im oberen Frequenzbereich werden die Unwuchtkräfte ermittelt, die zu Antwortgeschwindigkeiten in Höhe des Grenzwertes von $12,5 \mu\text{m/s}$ führen würden. Aus der Rückrechnung folgen ca. 9 kN für das 16 Hz Band und ca. 4 kN für das 20 Hz Band als maximal ertragbare Erregerkräfte, die für ein einzelnes im Techniktrakt installiertes Gerät noch akzeptabel sind. Diese Kräfte liegen um mehr als eine Zehnerpotenz über den zu erwartenden höchsten Unwuchtkräften aus den haustechnischen Geräten, so dass auch die Einwirkung mehrerer gleichzeitig laufender Geräte unschädlich ist. Falls die Drehzahl des Erregers im kritischen Frequenzbereich von 8 Hz bis 10 Hz liegen sollte, sind jedoch Maßnahmen am Erregergerät, z. B. eine schwingungsisolierte Aufstellung, zu empfehlen.

4. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Anhand des Beispiels eines Reinraumes für ein neu errichtetes Forschungszentrum wird die Eignung der aus der Strukturmechanik verfügbaren, analytischen Werkzeuge zur Erschütterungsprognose demonstriert. Es kann damit frühzeitig gezeigt werden, dass bei den gewählten konstruktiven Maßnahmen ein ausreichender Erschütterungsschutz des Reinraumes gewährleistet ist. Die messtechnischen Untersuchungen nach Rohbaufertigstellung bestätigen die rechnerischen Prognosen. Der Vergleich der rechnerischen mit den messtechnisch ermittelten Übertragungsfunktionen, Abbildung 5 und 7, zeigt, dass die maßgebende Eigenfrequenz mit dem Rechenmodell gut erfasst wird. Der Übertragungsfaktor wird bei den konservativen Annahmen in den Berechnungen jedoch überschätzt.